

小型ハイダイナミックレンジ6軸力覚センサの開発

19MM227 田村 龍也*

Ryuya Tamura*

1. まえがき

ロボットは従来、自動車の溶接や組み立てを行なうといった限定的な作業にのみ従事する産業用途が主であった。昨今は世界的な労働力不足の対策として細かな部品の組み立てや第三次産業の一端に携わるような協働ロボットが開発され、よりロボットの活躍の場が広がっている。

協働ロボットの中でも特に注目されているのが、人間を支援または人間の代替として活動するロボットである。これらのロボットには環境適応力が求められ、環境情報の取得が必要不可欠となっている。中でも力覚情報は多様な動作の実現のためには必須だと考えられ、

実際 DENSO の多関節ロボット⁽¹⁾ の安定した作業や ASIMO⁽²⁾ のお茶を注ぐ動作、ROBEAR⁽³⁾ の人を持ち上げるといった動作も力覚センサを用い、力覚情報を取得することで実現している。

力覚センサは印加された外力によって生じる構造体(以下, 起歪体)の変形量をセンシング素子により検知し, その変形量を元に印加された外力の推定を行なう。センシング素子により力覚センサの測定方式は異なり, ひずみゲージ式⁽⁴⁾ 静電容量式⁽⁵⁾, 光学式⁽⁶⁾など様々な検出方法が実用化されている。力覚センサの測定レンジは起歪体の剛性により決まり, 低剛性の起歪体は小さな力の検出が, 高剛性の起歪体は大きな力の検出が可能である。しかしこれは反対に, 1つの起歪体だけでは小さな力と大きな力の検出を行なえないことを示唆している。起歪体の変形を検知するという原理上, 分解能と定格荷重はトレードオフの関係にあり, 従来の力覚センサのダイナミックレンジ(測定可能な力の最小値と最大値の比)には制限が生じる。

これに対し Jiang らは低剛性起歪体と高剛性起歪体を組み合わせた 1 軸⁽⁷⁾, 2 軸⁽⁸⁾ の力情報を検知可能なハイダイナミックレンジ (HDR:High Dynamic Range) 力覚センサを提案した。また起歪体を用いず、水晶振動子による圧電効果を利用し HDR で力覚検知を可能にした 1 軸のセンサも提案されている⁽⁹⁾。さらに 1 軸, 2 軸での検知のみであった HDR 力覚センサに対し, Okumura らは 6 軸の力情報を取得可能な HDR 力覚センサ (size:150 × 150 × 45 mm) を提案し

た⁽¹⁰⁾. これはそれが6軸の力情報を取得できる低剛性起歪体と高剛性起歪体を二段に重ね合わせた構造をしており, 0.01N から 1000N までの力覚検知が可能である. 従来の 10 倍以上のダイナミックレンジを有した力覚センサとなつた.

しかし、提案してきた HDR6 軸力覚センサはセンサ自体のサイズが大きく、先述したようなロボットに導入する上で大きな問題となる。この問題に対し、Okumura らはさらに、低剛性起歪体と高剛性起歪体を一層に集約した樹脂製の HDR6 軸力覚センサ (size:100 × 100 × 30 mm) を提案した⁽¹¹⁾。樹脂製 HDR6 軸力覚センサは起歪体を水平に配置することでセンサの高さが低くなる。また高剛性起歪体の梁を短く設計したことで体積が小さくなった。しかし、樹脂製 HDR6 軸力覚センサは素材の特性上、クリープ現象や応力緩和といった金属製センサではあまり見られなかった特性が生じた。このことから HDR6 軸力覚センサを小型化する上で、センサ構造自体を工夫した金属製の力覚センサを提案することが重要だと考えられる。

そこで本論文では、小型な HDR6 軸力覚センサの開発を目的とし、新規な構造であるクロスアーチ型の低剛性起歪体を導入した HDR6 軸力覚センサを提案する。ここで提案する新規構造はアーチ状に設計した起歪体を交差させた形状のものであり、本構造をクロスアーチ型と呼ぶ。

2. 力覚センサの原理

6 軸力覚センサとはデカルト座標系における x, y, z 軸方向の力 (F_x, F_y, F_z) と力のモーメント (M_x, M_y, M_z) の大きさを測定するセンサである。本研究では一般的に広く利用されているひずみゲージ式を採用した。

力覚センサは起歪体に生じるひずみの変化量を力情報へと変換する。力覚センサに印加される荷重 $L(F[N], M[Nm])$ とひずみ出力 $S[\mu\text{m}/\text{m}]$ は次のように表せる。

荷重 \mathbf{L} とひずみ出力 \mathbf{S} は荷重-ひずみ行列 \mathbf{C} によって次のように関係付けられる.

また、荷重-ひずみ行列 \mathbf{C} の逆行列を用いると

$$\mathbf{L} = \mathbf{C}^{-1} \mathbf{S} \dots \dots \dots \quad (4)$$

となる。よってひずみ出力 S を元に印加された荷重 L の計測が可能となる。

次に較正行列の求め方⁽¹³⁾を述べる。ここで、すでに印加荷重 \mathbf{L} とそのときのひずみ \mathbf{S} の値が既知であり、そのサンプル数は n であるとする。つまり、 $\mathbf{L} = [\mathbf{L}^1, \mathbf{L}^2, \dots, \mathbf{L}^n]$, $\mathbf{S} = [\mathbf{S}^1, \mathbf{S}^2, \dots, \mathbf{S}^n]$ が既に与えられているとする。ここで、 $\mathbf{L}^k = [F_x^k, F_y^k, F_z^k, M_x^k, M_y^k, M_z^k]^\top$, $\mathbf{S}^k = [S_1^k, S_2^k, \dots, S_i^k]^\top$ とすると

によって \mathbf{C}^{-1} を求めることが可能である。以下、簡単のため \mathbf{L} の F_x のみを考える。較正行列 \mathbf{C} の逆行列 \mathbf{C}^{-1} を

$$C^{-1} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{16} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{26} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{61} & a_{62} & \dots & a_{66} \end{bmatrix} \dots \dots \dots \quad (6)$$

すると、 k サンプル目の F_x^k の予測値 F_x^{k*} は

と表される。式(5)は実際の印加荷重と予測値の残差二乗和

$$\sum_{k=0}^n d_k^2 = \sum_{k=0}^n (F_x^k - F_x^{k*})^2 \dots \dots \dots \dots \quad (8)$$

が最小となるような定数 $[a_{11}, a_{12}, \dots, a_{16}]$ を最小二乗法で導出するのと等価である。

3. 小型 HDR6 軸力覚センサの設計

小型 HDR6 軸力覚センサの設計と有限要素法シミュレーションを行うため, Autodesk, Inc. の Fusion360 を用いた。Fusion360 は 3D CAD, CAM, CAE を総合的に扱えるツールである。

〈3・1〉 起歪体の構造 提案する力覚センサの全体の構造を Fig. 1 に、低剛性起歪体、高剛性起歪体それぞれの構造を Fig. 2 に示す。

従来の多段型力覚センサは低剛性起歪体と高剛性起歪体とが上下に重なる構造をしており、高さ方向にサイズがかさばるといった問題が生じていた。今回提案するクロスアーチ型の低剛性起歪体は、中央の平板の各辺から梁が水平に伸び、ある点から折り曲がった構造をしている。これにより梁のない空間が必ず生まれる特徴がある。このクロスアーチ型を導入することで、低剛性起歪体の梁のない空間に高剛性起歪体を収めることができ、高さ方向のサイズの軽減が可能となった。また、従来の樹脂製 HDR6 軸力覚センサは各起歪体を水平に配置しているため、梁の長さを確保すると長さ、

幅方向にサイズが大きくなってしまっていた。本力覚センサは提案構造により、異なる高さで梁の長さを確保できるようになる。よって長さ、幅方向のサイズの軽減も可能となる。

力覚センサは小さい力を検知するための低剛性起歪体と大きい力を検知するための高剛性起歪体および過負荷防止機構によって構成される。力覚センサに印加された荷重は、低剛性起歪体の測定レンジ内では2つの起歪体に伝達される。低剛性起歪体の測定レンジ外の荷重は過負荷防止機構が作動することにより、低剛性起歪体にかかる負荷は一定となり、高剛性起歪体が伝達された荷重によって大きくなりずむ。過負荷防止機構により低剛性起歪体の過負荷防止と、印加荷重によって負荷が伝達される起歪体を決めることが可能となっている。

〈3・2〉 梁の設計

〈3・2〉 梁の設計 力覚センサの中でも梁の構造はセンサ性能に大きく影響する重要な要素であり、その構造は任意の定格荷重、荷重印加時のひずみ、安全率といったパラメータを参考に決定される。よって有限要素法シミュレーションにより荷重印加時の起歪体の挙動を調べた。

各起歪体に力と力のモーメント、併せて 6 成分の定格荷重を印加した。この時の安全率を Table 2 に示す。また Fig. 3 に $-F_z$ 方向に力を加えた時の各起歪体の挙動を示す。本力覚センサで設定した定格荷重は Table 1 に示す。

Table 1 定格荷重 ($F[\text{N}]$, $M[\text{Nm}]$)

	F_x	F_y	F_z	M_x	M_y	M_z
Low-rigidity	50	50	50	0.6	0.6	0.6
High-rigidity	500	500	500	10	10	12

低剛性起歪体 梁は低荷重に対して高感度である必要がある。よって、より細く長い梁が望ましい。しかし定格荷重を印加した時に塑性変形してしまう細さではいけない。本力覚センサの低剛性起歪体の梁の太さは 2mm 角に設計し

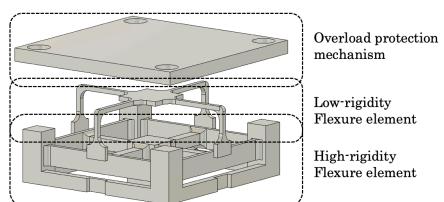


Fig. 1 全体の構造

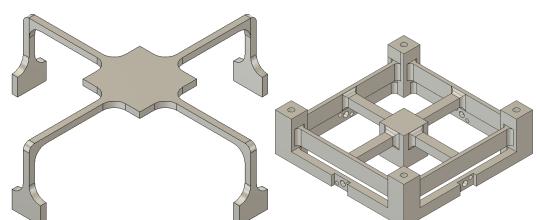


Fig. 2 各起歪体の構造

Table 2 安全率

	F_x	F_y	F_z	M_x	M_y	M_z
Low-rigidity	2.04	2.04	1.83	1.78	1.78	3.13
High-rigidity	1.37	1.37	1.39	1.23	1.23	1.78

た. Fig. 3 (a) より印加された荷重に対し良好なひずみが得られたことがわかる. さらに, 6 成分の定格荷重に対して安全率が 1 以上を確保できている. よって設計の妥当性が示された.

高剛性起歪体 高剛性起歪体の構造はクロスピーム型を参考としており, 外側剛体, 中央剛体, 弹性梁, 弹性薄板から構成される. 弹性梁は 5mm 角で 22.5mm の長さ, 弹性薄板は 2mm 厚, 9mm 幅で 56mm の長さである. Fig. 3 (b) より印加された荷重に対し良好なひずみが得られたことがわかる. さらに, 6 成分の定格荷重に対して安全率が 1 以上を確保できている. よって設計の妥当性が示された.

設計した各起歪体の寸法を Table 3 に示す.

Table 3 起歪体の寸法 [mm]

		Length	width	Height
Low-rigidity	Body	80	80	22
	Elastic bearn	28	2	2
High-rigidity	Body	80	80	23.5
	Elastic bearn	22.5	5	5
	Thin plate	56	2	9

〈3・3〉 過負荷防止機構の構造 過負荷防止機構の構造を Fig. 4 に示す. 過負荷防止機構はストップピン, ストップ板, 外側剛体（高剛性起歪体）から構成されている. 6 軸方向の各荷重に対し, 過負荷防止機構は以下のように動作する. 過負荷防止機構の作動荷重はストップピン, ストップ板, 外側剛体それぞれとのクリアランスによって決定される. 本力覚センサのクリアランスの寸法を Table 4 に示す.

- $\pm F_x$ および $\pm F_y$: ストップピンとストップ板が接触.
- $+F_z$: ストップピンとストップ板が接触.
- $-F_z$: ストップ板と外側剛体が接触.
- $\pm M_x$ および $\pm M_y$: ストップ板がストップピン, 外側剛体と接触
- $\pm M_z$: ストップピンとストップ板が接触.

Table 4 過負荷防止機構のクリアランス [mm]

Vertical clearance	Horizontal clearance
0.3	0.3

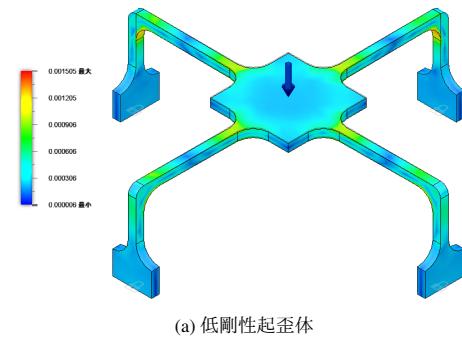
〈3・4〉 ひずみゲージ貼付位置 Fig. 5 に低剛性, 高剛性起歪体それぞれのひずみゲージの貼付位置を示す.

ここで, 各起歪体にはそれぞれ $R_1 R_{16}$ とラベリングされたひずみゲージが貼付されており, () 内に記されたひずみゲージは対となるひずみゲージの裏面に貼付されている. ひ

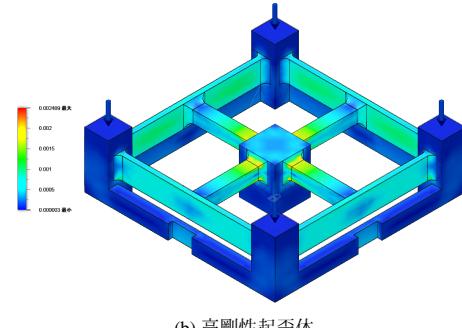
ずみゲージは全て, 中央剛体から 3mm 離れた位置に配置されている. ひずみゲージ R_i に生じるひずみ ε_i とひずみ出力 S は次のような関係で示せる.

$$\left\{ \begin{array}{l} S_{F_x} = \varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4 \\ S_{F_y} = \varepsilon_5 - \varepsilon_6 + \varepsilon_7 - \varepsilon_8 \\ S_{F_z} = \varepsilon_9 - \varepsilon_{10} + \varepsilon_{11} - \varepsilon_{12} \\ S_{M_x} = \varepsilon_{13} - \varepsilon_{14} + \varepsilon_{16} - \varepsilon_{15} \\ S_{M_y} = \varepsilon_{11} - \varepsilon_{12} + \varepsilon_{10} - \varepsilon_9 \\ S_{M_z} = \varepsilon_5 - \varepsilon_6 + \varepsilon_8 - \varepsilon_7 \end{array} \right. \dots \quad (9)$$

〈3・5〉 センサ出力 本力覚センサは印加荷重によって負荷が伝達される起歪体が異なる. よって低剛性起歪体と高剛性起歪体それぞれから出力信号が取得される. 2 つの出力信号には非線形性, 他軸干渉, ヒステリシスといった誤差が含まれており, 単に起歪体からの出力信号を切り替えるだけではセンサ出力に飛躍が生じる. これによりセンサ



(a) 低剛性起歪体



(b) 高剛性起歪体

Fig. 3 有限要素法シミュレーションによる結果

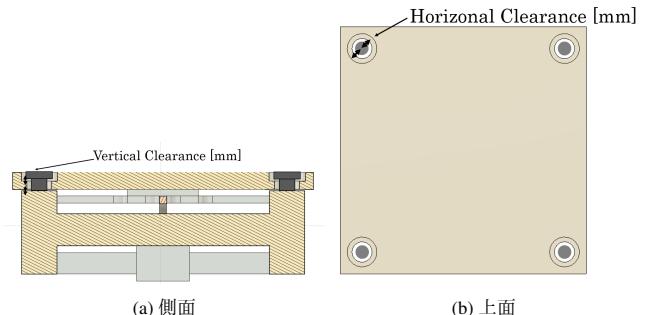


Fig. 4 過負荷防止機構

を導入したロボットの制御性能の劣化が生じる危険がある。そこで次式を用い、2つの起歪体から得られる出力信号を切り替える。

$$L_{out} = \alpha \mathbf{C}_L^{-1} \mathbf{S}_L + (1 - \alpha) \mathbf{C}_H^{-1} \mathbf{S}_H \dots \dots \dots \quad (10)$$

ここで \mathbf{C}^{-1} と \mathbf{S} は荷重-ひずみ変換行列とひずみ出力であり、下添え字 L は低剛性、H は高剛性を意味する。また、 α は出力信号の仕様比率を表す。 α は次の式で表される。

$$\alpha = \begin{cases} 0 & (L > L_{th}^{st}) \\ \frac{L_{th}^{fin} - L}{L_{th}^{fin} - L_{th}^{st}} & (L_{th}^{st} < L < L_{th}^{fin}) \\ 1 & (L < L_{th}^{st}) \end{cases} \dots \dots \dots \quad (11)$$

ここで、 L_{th}^{st} は切り替え開始の閾値、 L_{th}^{fin} は切り替え終了の閾値となっている。また、式(10)、式(11)を用いることで、

- (1) 印加荷重が L_{th}^{st} 以下の場合：低剛性起歪体の出力のみ使用
 - (2) 印加荷重が L_{th}^{st} 以上、 L_{th}^{fin} 以下の場合：飛躍した出力を抑制するため2つの出力を併用
 - (3) 印加荷重が L_{th}^{fin} 以上の場合：高剛性起歪体の出力のみを使用
- といったようにセンサ出力が決定できる。

4. 性能試験

実際に製作した力覚センサに対する性能試験の結果について述べる。今回の試験は各起歪体ごとに行なった。ストップ機構の働きを確認する試験は F_z 成分の結果を示す。

製作した力覚センサを Fig. 6 に示す。

<4・1> 非線形性・他軸干渉試験 力覚センサは荷重-ひずみ変換行列を用いて印加荷重を算出する。印加された荷重に対する出力値の非線形性や、印加された荷重以外の成分の出力が応答する他軸干渉は力覚センサの性能に関わる重要な指標である。

低剛性起歪体 任意に印加した荷重とひずみ出力の関係から式(5)をもとに正負それぞれの荷重-ひずみ変換行列を算出した。

$$\mathbf{C}_{+low}^{-1} = \begin{bmatrix} 13.4 & -9.8 & 3.3 & -2.71 & -0.2 & 14.2 \\ 7.7 & 32.3 & -2.5 & 5.1 & -6.4 & -9.5 \\ 0 & -2.9 & 8.1 & 0.1 & 1.1 & 1.5 \\ 0 & -0.1 & 0 & 0.1 & 0 & 0 \\ 0.1 & 0 & 0 & 0 & 0.1 & 0.1 \\ -0.1 & -0.1 & 0 & 0 & -0 & 0.2 \end{bmatrix} \times 10^{-3} \quad (12)$$

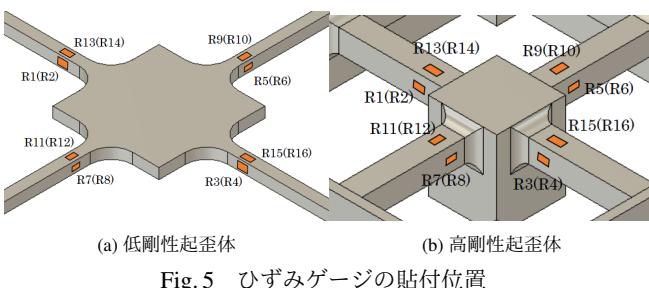


Fig. 5 ひずみゲージの貼付位置

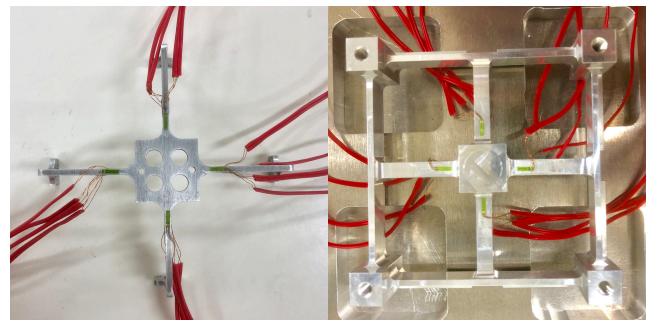


Fig. 6 製作した小型 HDR6 軸力覚センサ

$$\mathbf{C}_{-low}^{-1} = \begin{bmatrix} 40.1 & 12.6 & 10.4 & -0.1 & -10.5 & 17.7 \\ -13.7 & 16.3 & -4.2 & 3.8 & -0.1 & -15.2 \\ 6.3 & 1.7 & 9 & 0.6 & -1.3 & 3.1 \\ 0 & -0.1 & 0 & 0.1 & 0 & 0 \\ 0.2 & 0.1 & 0.1 & 0 & 0 & 0.1 \\ 0.2 & 0.2 & 0.1 & 0 & -0.1 & 0.2 \end{bmatrix} \times 10^{-3} \quad (13)$$

算出した荷重-ひずみ変換行列により変換した低剛性起歪体の荷重出力を Fig. 7 に示す。6 軸とともに線形的な出力結果が得られた。しかし、 F_x, F_z, M_z の結果を見ると、他軸干渉成分が較正しきれていないことが確認できる。

高剛性起歪体 低剛性起歪体同様に、任意に印加した荷重とひずみ出力の関係から式(5)をもとに正負それぞれの荷重-ひずみ変換行列を算出した。

$$\mathbf{C}_{+high}^{-1} = \begin{bmatrix} 10.3 & -0.2 & 5.3 & -3.9 & 0.4 & 3.7 \\ -0.2 & 6.6 & 0.5 & 0 & -0.4 & -0.1 \\ -0.7 & -0.6 & 7.1 & 0.3 & 0.8 & -0.2 \\ 0 & -0.2 & -0.1 & 0.2 & 0 & -0.1 \\ 0.3 & 0 & 0.2 & -0.1 & 0.2 & 0.1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.3 \end{bmatrix} \times 10^{-3} \quad (14)$$

$$\mathbf{C}_{-high}^{-1} = \begin{bmatrix} 10.1 & -0.7 & 3.9 & -3.8 & 0 & 3.7 \\ 0 & 6.9 & 0.6 & -0.1 & -0.4 & 0 \\ -0.1 & -0.1 & 6.9 & 0.1 & 0.8 & 0 \\ 0 & -0.2 & -0.1 & 0.2 & 0 & -0.1 \\ 0.3 & 0 & 0.1 & -0.1 & 0.1 & 0.1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.3 \end{bmatrix} \times 10^{-3} \quad (15)$$

算出した荷重-ひずみ変換行列により変換した高剛性起歪体の荷重出力を Fig. 8 に示す。 F_z, M_y 以外は比較的良好な線形性を有している。他軸干渉成分に関しては、モーメント成分の結果に比べ力成分の他軸干渉が大きく見られる。

さらに各成分に対する非線形性・他軸干渉に関して数値的評価を行う。非線形性・他軸干渉はそれぞれ以下の式によって導出した。結果を Table. 5, Table. 6 に示す。

$$NL^{F_x} = \frac{L_{true}^{F_x} - L_{out}^{F_x}}{L_{rated}^{F_x}} \dots \dots \dots \quad (16)$$

$$CC^{F_x} = \sqrt{\left(\frac{L_{out}^{F_x}}{L_{rated}^{F_x}}\right)^2 + \left(\frac{L_{out}^{F_y}}{L_{rated}^{F_y}}\right)^2 + \left(\frac{L_{out}^{M_z}}{L_{rated}^{M_z}}\right)^2 + \left(\frac{L_{out}^{M_y}}{L_{rated}^{M_y}}\right)^2 + \left(\frac{L_{out}^{M_x}}{L_{rated}^{M_x}}\right)^2} \dots \dots \dots \quad (17)$$

ここで, L_{true} は印加荷重の真値, L_{out} はセンサ出力, L_{rated} は定格荷重, 上添え字は 6 成分を表す。

低剛性起歪体は M_y 以外の軸では算出結果からも線形性が示された。高剛性起歪体は低剛性起歪体と比較すると非線形的であるが, Fig. 8 で確認できた結果同様に F_z, M_y 以外の軸は線形性が示された。また他軸干渉においては低剛性起歪体の結果が大きい数値を示している。これは主軸自体の出力値が小さい分、他軸成分が大きく干渉してしまっていると考えられる。

Table 5 非線形性 [%R.O.]

	F_x	F_y	F_z	M_x	M_y	M_z
Low	1.05	2.09	0.15	21.3	5.90	0.54
High	2.86	2.64	7.84	1.95	5.84	2.88

Table 6 他軸干渉 [%R.O.]

	F_x	F_y	F_z	M_x	M_y	M_z
Low	10.5	7.23	20.1	21.3	13.3	19.9
High	3.57	21.1	23.9	1.2	3.22	0.99

〈4・2〉 SN 比と測定レンジ Fig. 9 に F_z 成分の SN 比の推移を示す。この結果は高周波ノイズ (0.3%R.O.), 非線形性, 他軸干渉を考慮したものとなっている。高剛性起歪体のみの結果を見ると SN 比は低剛性起歪体の測定レンジ内で 0dB を下回っている。低剛性起歪体と高剛性起歪体を組み合わせた場合では 0.2N での SN 比が 0dB を上回る結果となった。この結果より, 高剛性起歪体のみでは低剛性起歪体を用いることで, 1 つのセンサとして測定が可能となっていることが分かる。よって本力覚センサは 0.2N から 500N の測定レンジを有していることが示された。

〈4・3〉 過負荷防止機構の働き F_z 成分の荷重を印加し過負荷防止機構の働きを確認した。Fig. 10 に印加された荷重に対する低剛性起歪体と高剛性起歪体のひずみ出力を示す。低剛性起歪体のひずみ出力は定格荷重として設定された 50N が印加されるまでは上昇し, それ以降はひずみ出力の上昇が見られない。高剛性起歪体のひずみ出力は 50N 以上の荷重印加以降, ひずみ出力が大きくなっているのが確認できる。よって過負荷防止機構が作動し, 荷重が伝達される起歪体が切り替わっていることが確認できた。

5. まとめ

HDR6 軸力覚センサの小型化を目的とし, クロスアーチ型の低剛性起歪体の梁のない空間に, 高剛性起歪体を収める新規構造の力覚センサを提案した。実際に製作した小型 HDR6 軸力覚センサは性能試験により, 力のモーメント成分に関しては優れた線形性を示し, 他軸干渉成分の多くは較正を行なうことで取り除くことができた。力成分に関しては較正後の数値が飛躍する問題が生じ, 他軸干渉成分を完全に取り除くことができなかった。また, 本センサは SN 比

より, 0.2N から 500N までの力覚検知が可能であり, ダイナミックレンジを有した状態でセンサの小型化がなされたといえる。今後は 0.2N 以下の小さいレンジでの測定を実現することで, 小型かつ, より HDR な 6 軸力覚センサの開発を目指す。

謝 辞

本研究を進めるにあたり, 丁寧かつ熱心なご指導を賜りました辻俊明准教授, 境野翔助教をはじめ大河原寛研究員に深謝いたします。また, 様々なご指摘をくださいました辻研究室の先輩方および同期の皆様に感謝いたします。

文 献

- (1) 力センサ有コンプライアンス機能. <https://www.denso-wave.com/ja/robot/product/function/Acontact.html> [Online; accessed 2019-02-14]
- (2) Honda—ASIMO. <https://www.honda.co.jp/ASIMO/>. [Online; accessed 2019-02-14]
- (3) 介護支援ロボット研究用プラットフォーム ROBEAR. <http://rtc.nagoya.riken.jp/ROBEAR/>. [Online; accessed 2019-02-14]
- (4) Tsuneo Yoshikawa and Taizou Miyazaki. A six-axis force sensor with three-dimensional cross-shape structure. In *Proc. IEEE Int. Conf. Robot. Autom.*, pp. 249–255. IEEE, 1989.
- (5) Felix Beyeler, Simon Muntwyler, and Bradley J. Nelson. A six-axis MEMS force-torque sensor with micro-Newton and nano-Newtonmeter resolution. *J. Microelectromechanical Syst.*, Vol. 18, No. 2, pp. 433–441, 2009.
- (6) Ji Chul Kim, Kyung Soo Kim, and Soohyun Kim. Note: A compact three-axis optical force/torque sensor using photo-interrupters. *Rev. Sci. Instrum.*, Vol. 84, No. 12, pp. 77–80, 2013.
- (7) Jun Jiang, Weihai Chen, Jingmeng Liu, Wenjie Chen, and Jianbin Zhang. Design of a Dual-Range Force Sensor for Achieving High Sensitivity, Broad Bandwidth, and Large Measurement Range. *IEEE Sens. J.*, Vol. 15, No. 2, pp. 1114–1123, 2015.
- (8) Jun Jiang, Weihai Chen, Jingmeng Liu, and Wenjie Chen. A cost effective multi-axis force sensor for large scale measurement : design , modeling , and simulation. pp. 188–193, 2013.
- (9) Yuichi Murozaki, Kousuke Nogawa, and Fumihito Arai. Miniaturized load sensor using quartz crystal resonator constructed through microfabrication and bonding. *Robomech J.*, Vol. 1, No. 1, p. 3, 2014.
- (10) Daisuke Okumura, Sho Sakaino, and Toshiaki Tsuji. High Dynamic Range Sensing by a Multistage Six-Axis Force Sensor with Stopper Mechanism. In *Proc. IEEE Int. Conf. Robot. Autom.*, pp. 1–6. IEEE, 2018.
- (11) 辻俊明, 奥村大輔, 境野翔. 多段型ハイダイナミックレンジ 6 軸力覚センサの小型化. 日本ロボット学会学術講演会, 2018.
- (12) 緒方浩二郎, 柏木邦雄, 小野耕三. 力覚センサ, 1991.
- (13) Ryosuke Hanyu, Toshiaki Tsuji, and Shigeru Abe. A simplified whole-body haptic sensing system with multiple supporting points. In *Proc. IEEE Int. Work. Adv. Motion Control*, pp. 691–696. IEEE, 2010.
- (14) 向井優, 野田善之. 六軸力覚センサの原理と構造. 精密工学会誌, Vol. 84, No. 4, pp. 303–306, 2018.

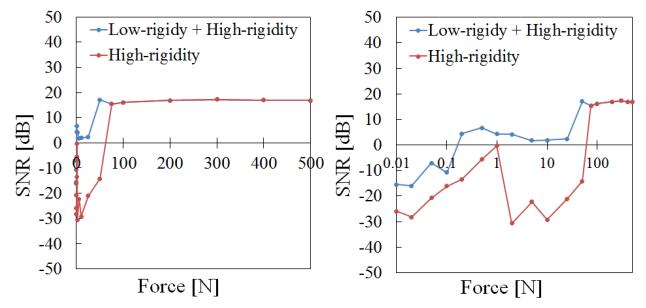
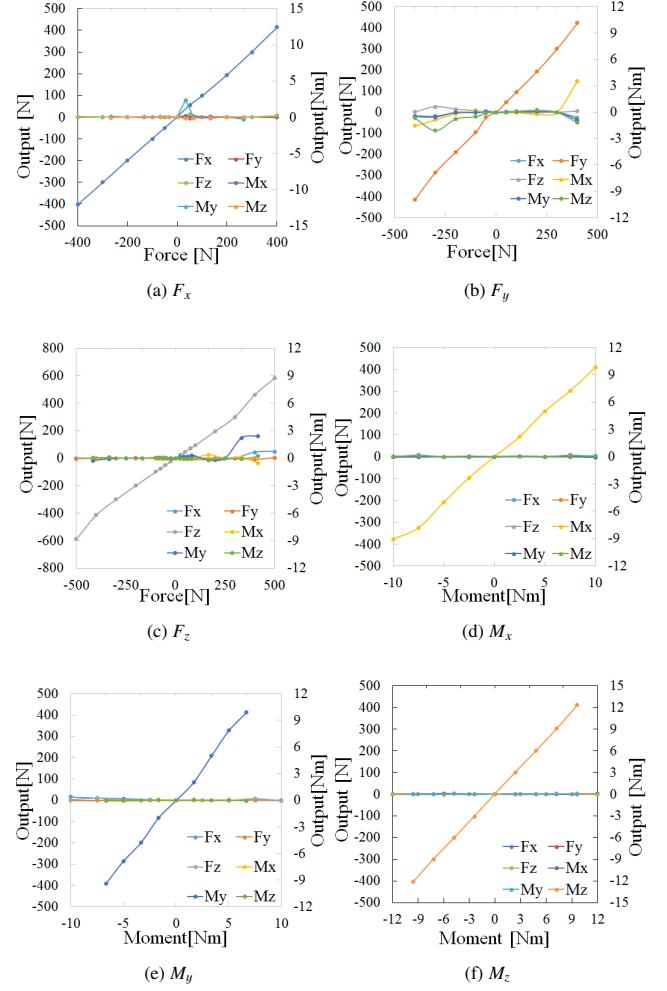
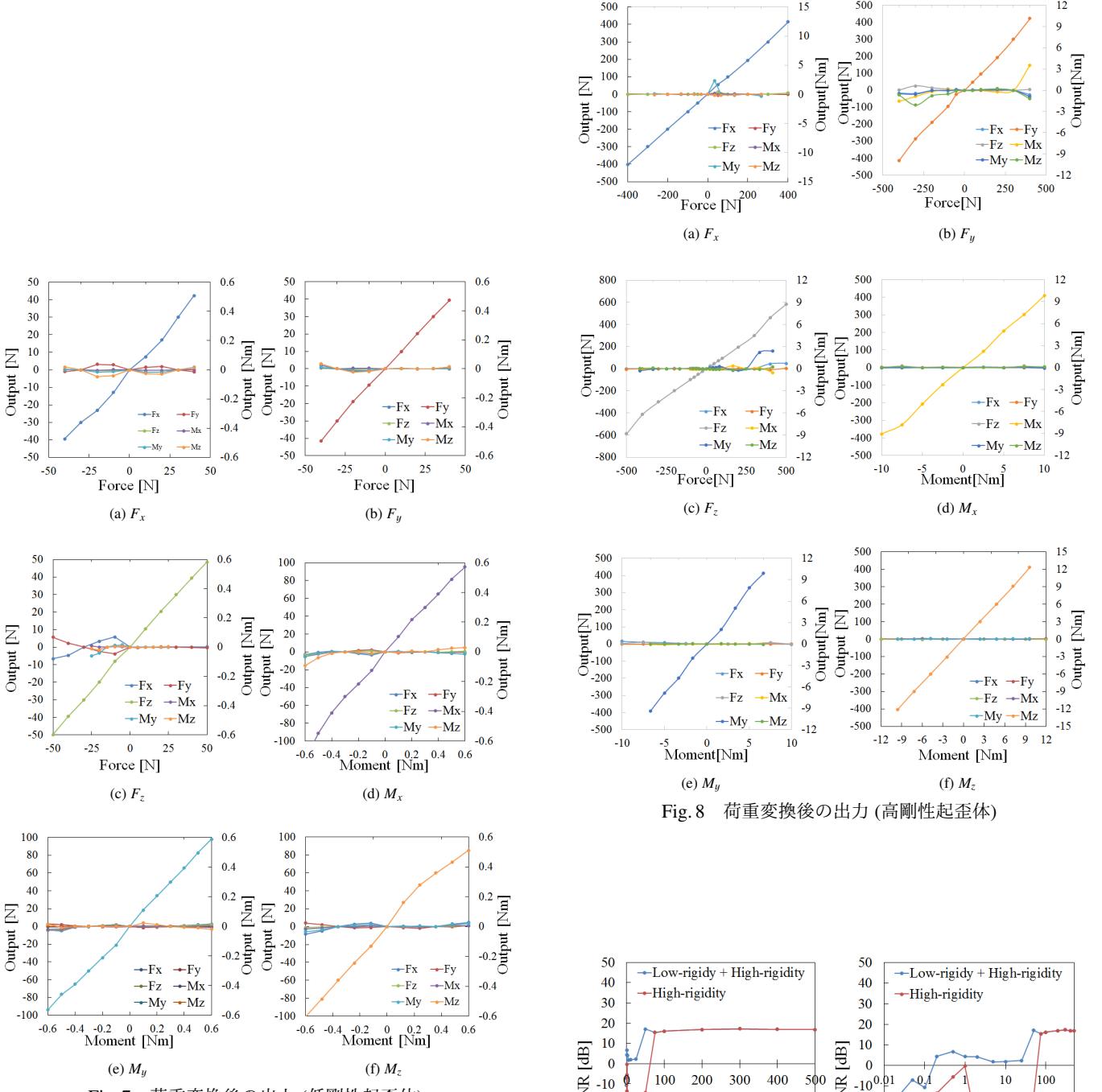


Fig. 10 $-F_z$ を印加時のひずみ出力